

基于雷达波和瑞利波综合物探探测道路地下病害研究

周乃圆¹, 何放², 尹方东³, 王金昌⁴

¹浙江交工路桥建设有限公司, 浙江 杭州

²沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳

³吉林省交通规划设计院, 吉林 长春

⁴浙江大学交通工程研究所, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月17日

摘要

城市建设过程中, 经常存在基坑与道路交叉施工, 基坑开挖导致土体的卸载会使周边道路出现不均匀沉降, 道路施工过程中有大量的重载作用, 可能会使道路和基坑出现功能性和一定的结构性的损坏。鉴于此, 依托杭州市某道路与09地块基坑交叉施工工程, 在介绍雷达波与瑞利波测试原理的基础上, 采用雷达波和瑞利波两种综合物探法探测基坑附近道路地下可能存在的病害, 确定病害的分布情况和规模。结果表明: 道路下方存在一定程度的脱空和土体松散, 二者的相互验证和补充, 表明探地雷达和面波法相结合能够探测道路地下病害, 为后继城市道路的风险分析提供量化指标。

关键词

探地雷达, 瑞利波, 雷达探测, 剪切波速

Research on Underground Pathological Conditions of Roads Based on Comprehensive Geophysical Exploration Using Radar Waves and Rayleigh Waves

Naiyuan Zhou¹, Fang He², Fangdong Yin³, Jinchang Wang⁴

¹Zhejiang Jiaogong Road and Bridge Construction Co., Hangzhou Zhejiang

²School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning

文章引用: 周乃圆, 何放, 尹方东, 王金昌. 基于雷达波和瑞利波综合物探探测道路地下病害研究[J]. 交通技术, 2025, 14(6): 754-764. DOI: 10.12677/ojtt.2025.146075

³Jilin Traffic Planning and Design Institute, Changchun Jilin⁴Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang

Received: October 13, 2025; accepted: November 6, 2025; published: November 17, 2025

Abstract

In the process of urban construction, there is often cross construction between foundation pits and roads. Excavation of foundation pits can lead to uneven settlement of surrounding roads due to soil unloading. During road construction, there is a significant amount of overload, which may cause functional and structural damage to certain degree of the roads and foundation pits. In view of this, based on the construction project of a certain road in Hangzhou and the intersection pit of 09 parcel, the comprehensive geophysical method is used to detect underground road diseases. The testing principles of radar waves and Rayleigh waves are introduced. Then the combined use of radar waves and Rayleigh waves for geophysical exploration is used to detect possible underground damage to the roads near the foundation pit, and then determine the distribution and scale of the disease. There is a certain degree of voiding and loose soil beneath the road. It can be seen that the combination of ground penetrating radar and surface wave method can detect underground road diseases, providing quantitative indicators for subsequent risk analysis.

Keywords

Ground Penetrating Radar, Rayleigh Wave, Radar Detection, Shear Wave Velocity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

城市道路下方地层分布随着城市地下空间的开发逐步发生改变, 导致道路下方的不同深度的不同类型的土层中逐渐产生松散甚至空洞等地下病害, 这些病害向上发展导致道路的支撑下降最终演化形成道路塌陷, 产生严重的伤亡以及财产损失。道路塌陷是一种隐蔽性极强的灾害, 其发生前一般道路下方早已形成不同的尺寸空洞, 但由于路面结构具有一定的强度和刚度使路面没有明显可见的破损迹象, 因此基于路表的沉降以及开裂很难探测到土层中演化的病害[1]。

现阶段, 国内外普遍采用的地下空间工程物探方法有: 浅层地震法、高密度电法、探地雷达法和面波法等, 其中瑞利波与探地雷达是当前城市道路地下病害检测经常采用的有效手段。探地雷达是通过将电磁波发射到地下来探测病害, 不同的介质会有不同的介电常数等电性差异。当电磁波遇到这种差异时, 会发生反射而产生强烈的反射波[2]。瑞利波由地震波干涉产生, 它沿介质二维表面扩展, 一般波长越长可测到的深度越深, 弥补了探地雷达探测深度小的缺点, 同时瑞利波可以给出剪切波速, 从而推算出剪切模量, 为力学计算分析提供一定的参数[3]。根据面波在上硬下软成层地基中的传播特性, 采用反演方法, 由表面波速度弥散曲线反演出路面下各层位的横波速度, 从而得到路面下各层位的剪切波速。探地雷达与面波法因其高效适用的特点、直观形象的探测成果、简单的解译过程等优势被广泛应用[4]。王迎霜等[5]以郑州市一住宅区为例, 应用综合物探技术, 对该住宅区的地表沉降问题进行了研究。崔海涛[6]

通过多个城市的工程探测实践，形成了一套车载阵列雷达预警道路崩塌事故检测技术与手段。尹玉茹[7]运用面波法，对东湖区道路的地下空间进行探测。尽管目前探地雷达技术已经相当成熟，但是在实际运用过程中，仍然需要根据当地的地质情况积累经验，探地雷达具有探测深度浅，但是道路探测时不需要中断交通，因此在道路的下部普查中获得了广泛应用。但仅根据雷达图像并不能揭示其力学性能。

本文对探地雷达和瑞利波法的工作机理和在应用的过程中的一些关键技术进行分析，探索道路地下病害的分布情况和规模，以及与力学性能参数相关的波速的变化，为后续的风险评估提供量化指标，同时为道路的养护维修提供更为充分的科学依据。

2. 工作原理

探地雷达向地下发射电磁波探测病害，其信号会在病害体与地下介质的电性差异处发生散射和反射，通过观察回波信号的波形图，可以检测出地下的异常，从而能够检测出地下的空洞[8]。探地雷达扫描时通常会将波形图转化为灰度图，反射信号的幅值以颜色的强弱来表示，频率则以色块的厚度来表示。灰度图可以更直观，更清晰地显示出道路地下构造的异常。

瑞利波利用瞬态面波法进行地层结构测试，可以在不破坏结构的情况下进行测试，过程简单、快捷，且能够获得与深度相关的地层面波速度参数，广泛应用于岩土工程现场测试中。利用反分析法可以从面波速弥散曲线获得各层剪切波速和土层深度的信息。现场测试时可在一测线上布置多个传感器，通过分析不同间距的传感器信号得到不同深度土层的参数，如剪切波速或空洞位置。面波法的测试深度与震源的激振频率相关，如果测试较深处土质情况则需要低频信号，浅层地质情况则高频信号，主要是通过调整激振锤的方式来实现。瑞利波的工作原理见图 1 所示，根据加速度的时域信号，通过频谱分析以及反演优化得到各个分层土层的剪切波速。

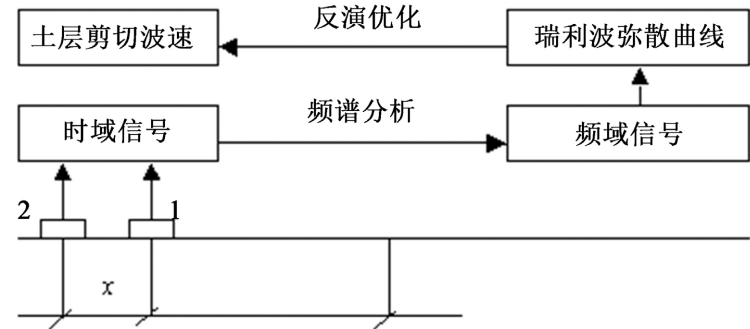


Figure 1. Test principle of Rayleigh wave method
图 1. 瑞利波法测试原理

3. 工程实例应用

3.1. 工程概况

本项目位于杭州市，在建道路是区块内东西向重要的城市次干道，道路全长约 338 m，实际实施范围全长约 414 m，标准段宽 36 m，采用双向六车道，三块板形式。道路北侧为正在施工的基坑，基坑北侧为盾构区间。基坑大致呈梯形，东西向最长约 230 m，南北向最长约 115 m，外围支护结构延长米约 625 m。基坑北侧为杭州地铁 1 号线九堡车站，在开挖范围内涉及车站与区间的盾构隧道，为了保护近接的地铁运营的安全控制基坑变形对其不利影响，对整个基坑进行了分坑处理，整体上划分 6 个小基坑，而靠近地铁侧北侧基坑采用了小坑，南侧采用了大坑，不同的基坑之间采用了竖向围护结构进行了空间分割。

南侧为东城路在建的市政道路，施工基间已经完成水稳基层和底基层的施工，基坑周围的地铁和市政道路的相对位置关系见图 2 所示。建设的市政道路边界与基坑边界基本重叠。南侧靠近道路的基坑围护结构的断面见图 3 所示，基坑开挖深度为 14.10 m，坑底向下的插入深度为 20.9 m，采用两道型钢支撑，从地表向下分别分布杂填土、砂质粉土和淤泥质粉质粘土等。基坑施工过程中，南侧靠近道路侧布置了深层土体位移监测，监测的数据显示发生了较大的侧向位移，最大侧向位移在 50 mm~140 mm 之间，发生在地表以下 8.5 m~15 m 之间。因此对近接的东城路有一定的影响，水泥稳定碎石表面发生了开裂，见图 4 所示，因此需要对该道路下的是否脱空这一安全问题进行探测。

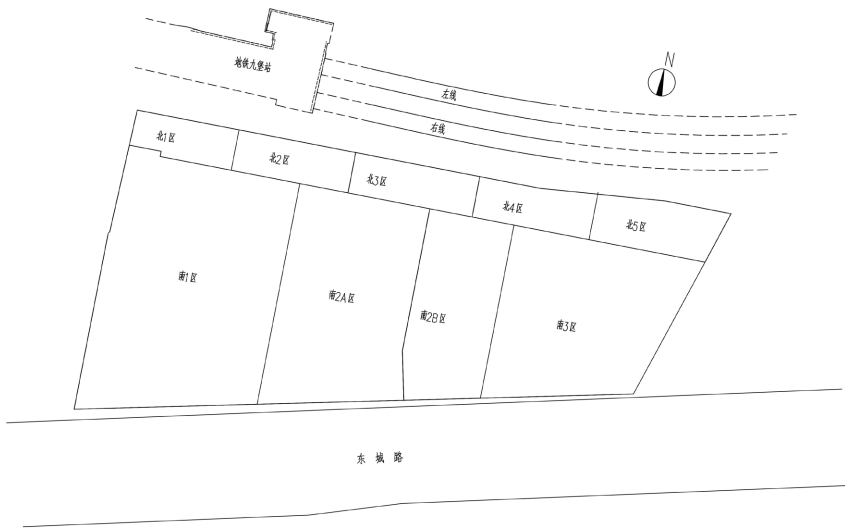


Figure 2. Distribution map of the interrelationship between the foundation pit and the surrounding roads and subways
图 2. 基坑与周围道路与地铁相互关系分布图

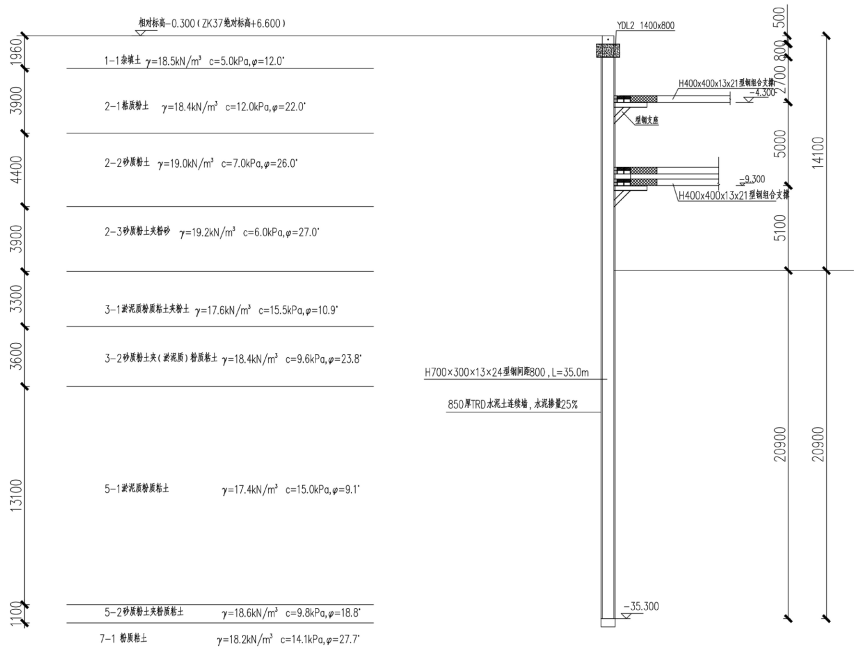


Figure 3. The cross-section and stratum distribution of the foundation pit on the side close to the municipal road
图 3. 靠近市政道路侧基坑剖面及地层分布



Figure 4. Cracks on the surface of the cement-stabilized base layer

图 4. 水泥稳定基层表面产生的裂缝

3.2. 道路探地雷达检测

临近基坑的道路上临时堆放桥梁的上部结构的钢节段产生的附加应力，以及基坑开挖引起的侧向不均匀变形，对铺设完成的水泥稳定碎石路面形成的开裂损伤，是否是因为深层的地层的脱空及松散。因此采用探地雷达进行测量，雷达装置及典型的影像图分别见图 5 和图 6 所示。沿着临近的道路的纵向布置纵线，共完成 21 条测线，测线总长度 4285 m。



Figure 5. Hand-pushed radar

图 5. 手推雷达



Figure 6. Radar image

图 6. 雷达影像图

图 7 所示为 3 号测线(60 m~100 m)雷达解释图，图中存在 1 处异常区：测线里程 79.2 m~99.4 m，深

度 1.6 m~3.3 m 范围, 雷达波在不同的密度土体中形成不同的反射, 以及在不同的层间白色界面的反射, 反向的集中区的不连续推测为土层疏松。图 8 所示为 4 号测线(194 m~218 m)雷达解释图, 图中存在 1 处异常区: 测线里程 214.1 m~218.0 m, 深度 1.1 m~2.1 m 范围, 雷达波白色同相轴在局部区域不连续, 多次高频反射, 推测为脱空。通过对所有数据的分析整理, 得到在不同测线位置的病害平面分布, 如图 9 所示, 左下角为零点, 水平向标注为距离该点的距离, 左侧竖向标注的测线的编号, 把测线编号、相对于零点的位置以及病害的类型进行整理, 所得结果见表 1 所示。

从地下异常分布表和平面分布图可以看出道路共存在 3 处脱空, 5 处土体松散。第一处脱空为 12 号测线 147.8 m~160.1 m, 深度 1.1 m~2.1 m 范围; 第二处脱空为 13 号测线 151.2 m~160.0 m, 深度 1.3 m~2.4 m 范围; 第三处脱空为道路尽头与桥梁连接处。桥头段存在搭板存在一定刚度的竖向支撑, 同时因为桥头段在施工阶段压实度难以控制, 因此桥头段存在更多的不同程度的脱空和松散。而在中间区域存在松散, 这些位置基本位于基坑南侧中间的区域, 受到基坑开挖变形影响更大所致。

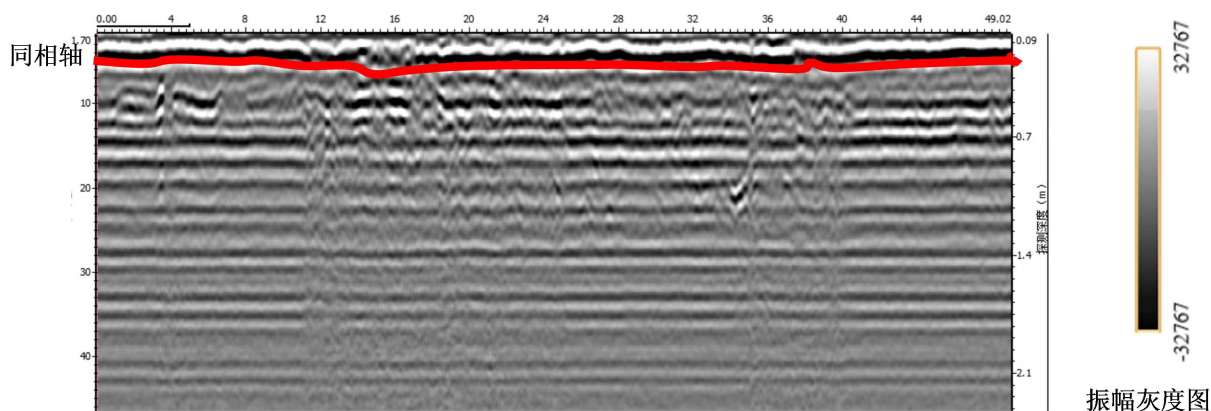


Figure 7. Explanation diagram of the radar results of the No. 3 survey line (60 m~100 m)

图 7. 3 号测线(60 m~100 m)雷达成果解释图

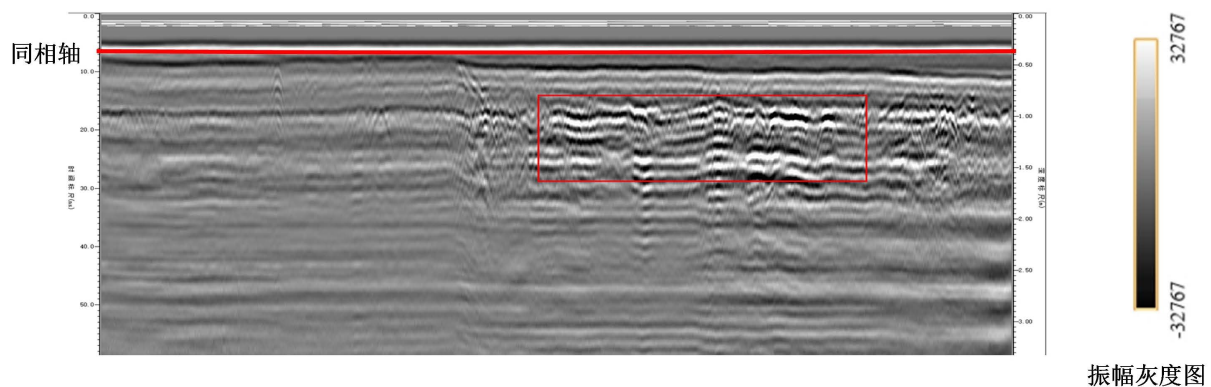


Figure 8. Explanation diagram of the radar results of the 4th survey line (194 m~218 m)

图 8. 4 号测线(194 m~218 m)雷达成果解释图

Table 1. Underground abnormal distribution area table (270 MHz)

表 1. 地下异常分布区表(270 MHz)

测线编号	病害类型	平面位置(m)	深度范围(m)
3	疏松	79.2~99.4	1.6~3.3

续表

6	脱空	125.6~139.9	1.1~1.4
8	脱空	217.1~220.0	1.0~1.4
10	疏松	217.6~221.8	0.9~2.1
11	脱空	218.7~224.0	0.9~1.2
12	脱空	147.8~160.1	1.1~2.1
		220.5~225.0	0.7~0.9
13	脱空	151.2~160.0	1.3~2.4
14	脱空	222.1~225.0	0.8~1.0
17	疏松	104.7~110.6	0.9~1.6
	脱空	100.1~104.4	0.9~1.3
	松散	221.2~227.0	0.9~2.4
	松散	122.4~133.6	1.4~2.6
18	松散	194.3~203.9	1.1~1.9
	脱空	218.3~222.0	0.9~1.3

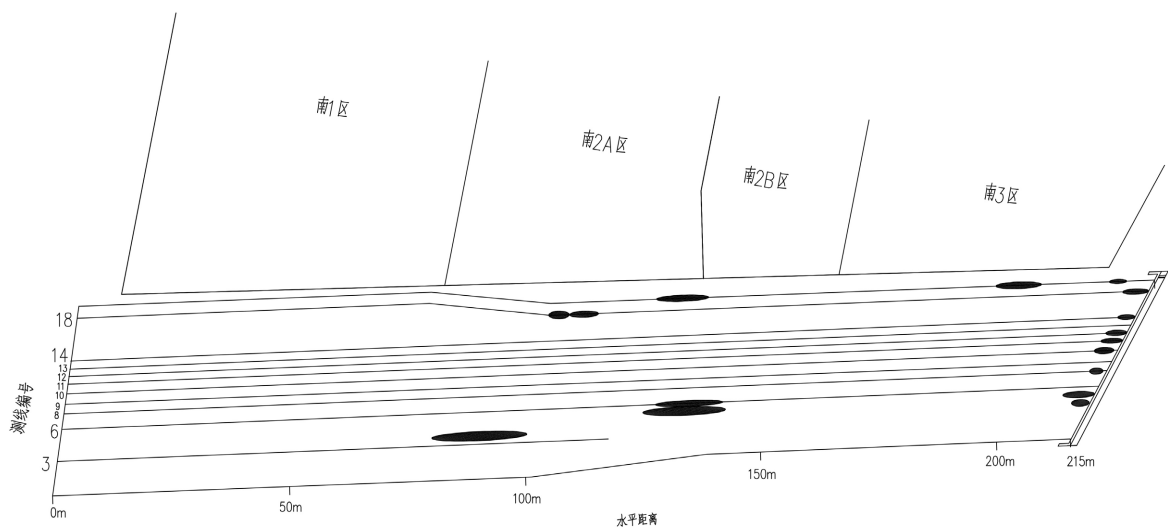


Figure 9. Schematic diagram of underground disease distribution
图 9. 地下病害分布示意图

3.3. 依托工程道路瑞利波检测

根据雷达波得到了对地下松散区域的判断，但是并不能给出松散以后的力学指标，因此需要通过瑞利面波法进行探测补充，一方面是两种方法相互验证，另外也可以把面波法用于更深的探测。因此对于存在脱空相对严重的部位，采用瑞利波进行深层次探测。具体测线布置如图 10 所示。现场采集采用的方法如图 11 所示，现场将采集仪与加速度传感器连接完成，按照预设的布点图进行布置。每 4 m 安装一个加速度传感器，每 4 个加速度传感器为一组(即一条测线长 12 m)，每条测线分别采集 2~4 次。震源采用人工激发的方式，在距离第一个传感器前方 10 m~15 m 的范围放置橡胶垫，人工锤击于橡胶垫上，如图 12 所示，确保产生的波为频率低，波长可用于检测收集的面波。

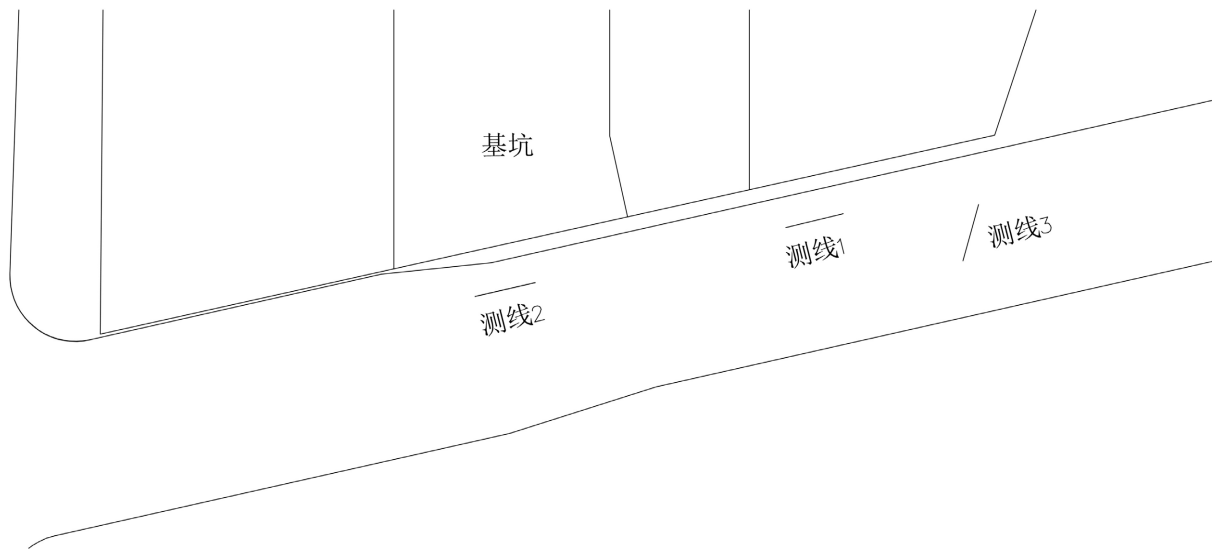


Figure 10. Layout diagram of Rayleigh surface wave measurement lines
图 10. 瑞利面波测线布置图



Figure 11. On-site collection
图 11. 现场采集



Figure 12. The heavy hammer strike for energy input
图 12. 能量输入的重锤敲击

四个加速度传感器得到的典型时程曲线见图 13 所示, 由于波传播的时序性, 不同位置的加速度传感器获得的峰值逐步后移, 而且逐步衰减。

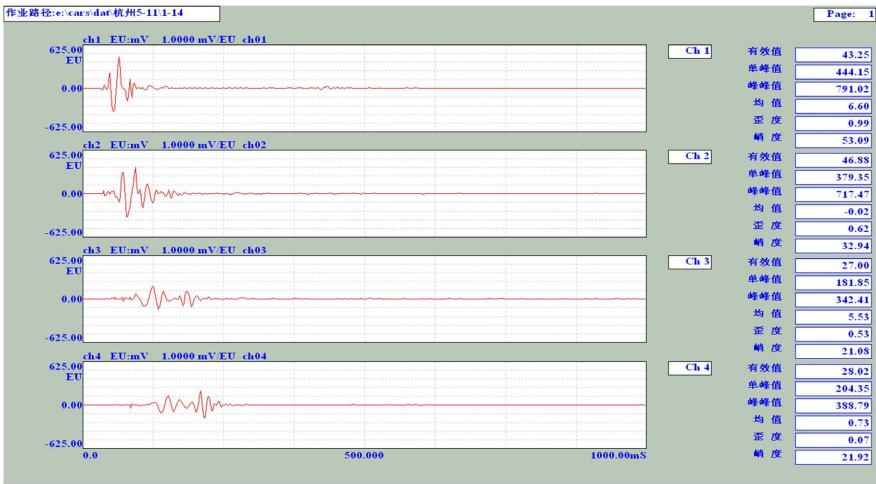


Figure 13. Typical time-domain curve
图 13. 典型时域曲线

通过对测试数据的系统分析, 得到路基土层剪切波速与对应深度的关系曲线。图 14 为测线 1 的瑞利波法路基剪切波速曲线, 由图可知, 测线 1 在地下 1 m~3 m 范围内剪切波速较小, 仅为 72 m/s 左右, 推测测线 1 在此深度的土层存在脱空现象。其他区域波速与土层波速情况基本符合。图 15 为测线 2 的瑞利波法路基剪切波速曲线, 由图可知, 测线 2 在地下 0 m~2 m 的范围内出现剪切波速与实际土层剪切波速不符合且差值较大的情况。这是受到测线下方的混凝土板影响, 导致波速显示的是为杂填土与混凝土板混合情况。其他区域波速无明显异常。图 16 为测线 3 的瑞利波法路基剪切波速曲线, 由图可知, 测线 3 的整体剪切波速都要略高于地勘数据, 这是因为测线 3 位于路桥交接处, 施工方对此处地下进行注浆加固工作, 因此整体剪切波速偏大。

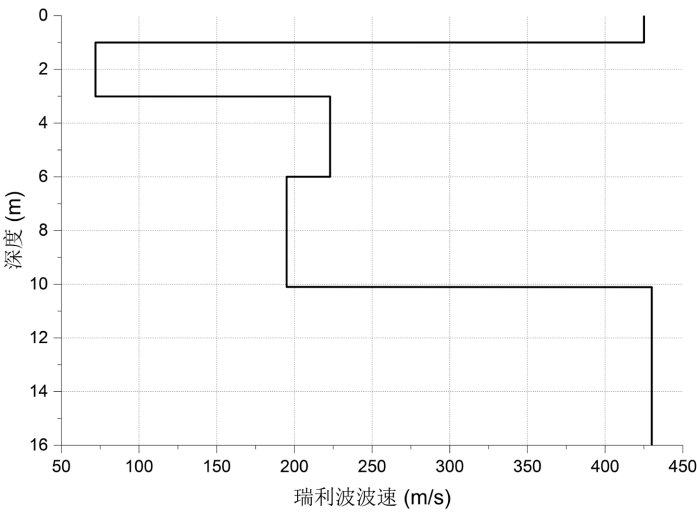


Figure 14. The rate-depth curve of the Rayleigh wave method for Line 1
图 14. 测线 1 瑞利波法波速 - 深度曲线

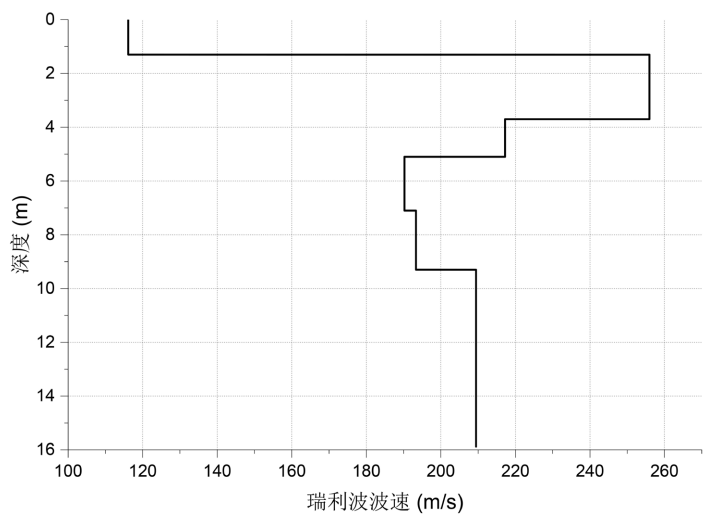


Figure 15. The wave-depth curve of the Rayleigh wave method for line 2
图 15. 测线 2 瑞利波法波速 - 深度曲线

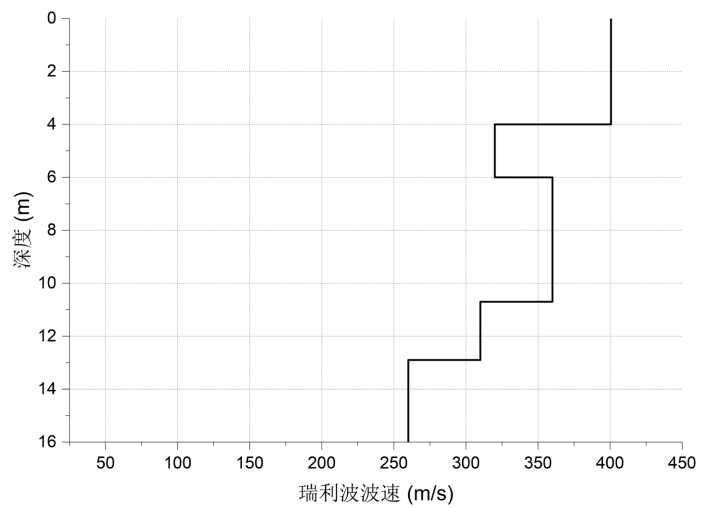


Figure 16. The wave-depth curve of line 3 by the Rayleigh wave method
图 16. 测线 3 瑞利波法波速 - 深度曲线

通过对瑞利波的探测结果可以看出，测线 1 下方存在脱空区域，测线 2 下方存在土体疏松区域，测线 3 无明显异常，其探测结果与探地雷达的探测结果基本一致，证明基于瑞利波法进行道路下部探测的准确性，同时给出了与土层力学相关的剪切波速指标，该指标可以得到土体剪切模量。

4. 结论

深基坑开挖势必对临近的市政道路产生影响，本文采用探地雷达和瑞利波结合的方法对基坑施工影响的市政道路下部的可能存在的病害进行探测，通过对雷达波谱图形以及瑞利波的加速度时程曲线的反演，通过分析得出：

(1) 为了保护深基坑北侧的近接地铁车站和区间盾构隧道的影响，采用了分坑处理，但是南侧紧邻的市政道路采用大坑，并没有很好控制该侧的基坑变形，导致该侧道路产生比较的深层土体位移，从而对市政道路产生不利影响，与地面的堆载叠加共同作用下，水泥稳定碎石路表产生了纵向开裂。

(2) 通过沿着市政道路纵向设置多条测线, 获得了雷达波图谱, 探测到了在基坑中部区域道路下部存在松散和脱空的病害, 另外是在桥头路段因为压实控制的固有问题导致存在多发的松散和脱空问题。

(3) 在雷达探测揭示的病害位置的基础上, 对其中三处采用在路表布设加速度传感器, 通过距离第一个加速度计一定距离放置橡胶垫块, 采用锤击橡胶垫块产生击发能量。对加速度时程曲线进行反演得到了三个位置的剪切波速, 剪切波速在雷达揭示的位置的误差, 说明了基于瑞利波探测道路下的病害的有效性。

雷达波法和与面波法结合的方法可以用于市政道路下病害如脱空和松散的探测与评定, 雷达波法给出了清晰的影像图, 而面波法给出了能够反映土层的波速的变化, 而波速可以用于土层力学指标的确定, 为后继深入的力学计算分析从而对道路的可能存在的坍塌提供一定的基础数据。

参考文献

- [1] 万诚. 基于神经网络的沥青路面纵横向裂缝演化预测研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [2] 龚晓南, 杨仲轩. 岩土工程测试技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [3] 尹方东. 基坑开挖对在建道路的影响及风险分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- [4] 杜翠, 戴天, 王科盛, 等. 路基探地雷达图像层位智能识别与状态评价[J]. 铁道建筑, 2023, 63(4): 84-87.
- [5] 王迎霜, 苏志军. 综合勘测方法在城市人防工程地质勘查中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 71-75.
- [6] 崔海涛, 陈洁, 李民, 等. 车载阵列雷达在道路塌陷灾害预警探测中的技术应用[J]. 测绘通报, 2016(S1): 61-63, 72.
- [7] 尹玉茹, 黄光南, 汤洪志, 等. F-K 变换与主动源面波法在南昌市昌东地质调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(1): 82-89.
- [8] 李沁璘. 探地雷达应用研究综述[J]. 科学技术创新, 2021(4): 73-74.